中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）46(4)：388～406（1997）

噴霧屏蔽行進中性能之模擬[1]

蔡致榮[2]　H. Erdal Ozkan[3]

摘要：有關屏蔽噴霧之風洞試驗大都於靜止情況下進行，而田間試驗則著重於飄移數量之調查，因此，並無行進中噴霧屏蔽性能之資料可資參考，更別提噴霧屏蔽之行進速度與行進方向對降低噴霧飄移之影響，本研究中使用電腦流體動力模擬軟體 FLUENT，模擬雙弧形薄板屏蔽以研究行進屏蔽於不同行進速度與行進方向對降低飄移之影響。同時，更進一步比較三維度氣流中機械式屏蔽與氣流式屏蔽之行進屏蔽效果。本研究所得之主要結論如后，風速與噴霧機行進速度間區域相對速度在控制行進中噴霧機之噴霧飄移上扮演重要角色，區域相對速度愈大，飄移潛勢愈大。傳統噴霧當噴霧機逆風作業時飄移潛勢隨行進速度之增加而略微增加，但當噴霧機順風作業時只要噴霧機行進速度小於風速，飄移潛勢係隨行進速度之增加反而降低。雙弧形薄板屏蔽對於降低飄移之表現，不管是逆風或順風作業都比無屏蔽噴霧來得佳，而逆風作業顯然比順風作業有較低之飄移潛勢。行進速度1.34m／s 下比較三維度氣流中屏蔽性能之模擬結果顯示雙弧薄板屏蔽分別於逆風與順風作業時，提供相較於傳統逆風向下噴霧達60.6%與29.3%之減低飄移效果，而具最佳操作設定之氣流屏蔽不管是逆風或順風作業都提供減低飄移之完全控制。

關鍵詞：噴霧屏蔽、行進、CFD 模擬、FLUENT。

前　　言

有關屏蔽噴霧（shielded spraying）之風洞試驗大都於靜止情況下進行[3,7,12,15]，而田間試驗則著重於飄移數量之調查[2,5,9,12]，因此，並無行進中噴霧屏蔽性能之資料可資參考，更別提噴霧屏蔽之行進速度與行進方向對降低噴霧飄移之影響，然而實際上噴霧屏蔽係隨噴霧機而移動，由於此問題本身之複雜性、試驗室所需設備是否可得，以及許多田間試驗無法控制之變數等因素，想進行此類實際試驗事實上有其困難，然而，倘使用電腦流體動力（Computational Fluid Dynamics, CFD）模擬軟體，則相當方便以獲得行進中噴霧屏蔽之空氣動力特性。

本研究之目的有二：其一，探討二維度氣流中噴霧屏蔽行進中之性能：係使用蔡氏[13]所得機械式屏蔽中性能最佳之雙弧形薄板屏蔽（double foil shield）以研究行進中屏蔽於不同行進速度（1.34、1.79、2.24與2.68 m／s）與行進方向（逆風與順風）下對降低飄移之影響，同時比較有關無屏蔽傳統噴霧之情形。其二，比較機關式與氣流式噴霧屏蔽之行進性能：蔡氏研究所得最佳性能之機械式屏蔽（雙弧形薄板屏蔽）與氣流式屏蔽[1]被模式化以模擬三維度氣流中只具單一霧粒釋放噴頭之屏蔽效果。

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告第 1922 號。
2. 本所農業工程系助理研究員。臺灣省　臺中縣　霧峰鄉。
3. 美國俄亥俄州立大學食品、農業與生物工程系教授。美國　俄亥俄州。

理論分析

本研究中普通用途之 CFD 軟體 FLUENT ® 被使用以模擬位於屏蔽附近之流場與霧粒軌跡，對此霧粒移動之模擬，FLUENT 視空氣流為連續相，而視霧粒為於此連續相中第二散佈相，基本上無霧粒存在之流場縮斂解首先求得，而後第二散佈相之霧粒才被導引進入縮斂流場中，霧粒軌跡可被追蹤而作其他評估用途。底下略述 FLUENT 模擬根據之理論基礎，其包括連續相之標準 K-ε 紊流模式（K-ε turbulence model）與壁函數（wall function），以及第二散佈相之拉格蘭散佈模式（Lagrangian dispersed model）與熱質傳計算。

一、FLUENT 之 K-ε 紊流模式

FLUENT 所採用具固定黏度不可壓縮紊流在直角座標系 Xi 軸向之基本方程式有

質量守恆方程式：$$\frac{\partial\left(\bar{U}_i\right)}{\partial x_j}=0 \qquad (1)$$

此處 U_i 係 X_i 軸向流體之速度。

動量守恆方程式：

$$\rho\frac{\partial}{\partial t}\bar{U}_i+\rho\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{U}_j\bar{U}_i)=\rho g_i-\frac{\partial\bar{P}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial\bar{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{U}_j}{\partial x_i}\right)-\rho\overline{U_j'U_i'}\right] \qquad (2)$$

此處ρ係流體質量密度（density），ρg_i 係作用在流體單位體積內於 X_i 軸向之外力，乃只考慮重力效果而言，P 係壓力，μ係流體動力黏度。方程式(1)與(2)中具上方刻劃⁻者係代表對應之平均值，具′符號者係代表對應項對平均值之變動值（fluctuation），而具下標 $_j$ 者係張量（tensor）表示方式，其代表加法協定（summation convention）被使用於這些具重複性指數之各項。

在 FLUENT 的 K-ε紊流模式中，不可壓縮流之雷諾應力（Reynolds stresses）係根據Boussinesq 假設[6]，以紊流黏度μt 為比例常數而與平均速度梯度相關連如下式。

$$\begin{aligned}\rho\overline{U_i'U_j'}&=\frac{1}{3}\rho\overline{U_i'U_i'}\delta_{ji}-\mu_t\left(\frac{\partial\bar{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{U}_j}{\partial x_i}\right)\\&=\frac{2}{3}\rho K\delta_{ij}-\mu_t\left(\frac{\partial\bar{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{U}_j}{\partial x_i}\right)\\&=\bar{P}_t-\mu_t\left(\frac{\partial\bar{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{U}_j}{\partial x_i}\right)\end{aligned} \qquad (3)$$

此處$\delta_{ji}=1$ forj=i and $\delta_{ji}=0$ forj≠i；K 係紊流動能（turbulent kinetic energy），對等向性紊流（isotropic turbulence）而言，$K=\frac{1}{2}\overline{U_i'U_i'}$；$\bar{P}_t$ 係紊流壓力平均值。當方程式(3)被代入方程式(2)後，雷諾平均化（Reynolds averaged）動量方程式仍然同於紊流動量方程式，但是μ與 P 被以有效值取代如下

$$\rho\frac{\partial}{\partial t}\bar{U}_i+\rho\frac{\partial}{\partial x_j}\ (\overline{U_j'U_i'})\ =\rho g_i-\frac{\partial P_{eff}}{\partial x_i}+\mu_{eff}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\bar{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\bar{U}_j}{\partial x_i}\right) \qquad (4)$$

此處$\mu_{eff}=\mu+\mu_t$；$P_{eff}=\bar{P}+\bar{P}_t$。紊流黏度$\mu_t$ 可假設它與速度規模 v 與長度規模1之乘積成正比而獲得，在 K-ε紊流模式中，其與紊流動能 K 與紊流動能消散率（the dissipation rate of tubulent kinetic energy）ε相關連如下

$$\begin{aligned}&\mu_t\sim v1\sim\sqrt{K}\frac{\sqrt{K^3}}{\varepsilon}\sim\frac{K^2}{\varepsilon}\\&\mu_t=\rho C_\mu\frac{K^2}{\varepsilon}\end{aligned} \qquad (5)$$

其中 C_μ乃經驗常數，在 FLUENT 中 C_μ之預設值為0.09。至於 P_{eff} 在霧粒移動之模擬中並不重要，此處不予討論。

二、FLUENT 之壁函數

在 FLUENT 中經驗壁函數被使用以替代在近壁之網格點（grid point）上求解整個紊流邊界層（turbulent boundary layer），壁函數根基於假設有一完全發展之平衡紊流邊界層存在，所有相關之流體特性可由描述此邊界層之對數律（log law）而獲得，使用 FLUENT 之標準壁函數時紊流中壁邊界層係由一穩流次層（laminar sublayer）與一完全紊流之對數律區組成，而壁剪切應力可如下加以計算

在完全紊流之對數律區 $y^+>11.25 \Leftrightarrow \frac{U_p}{U^*}=\frac{1}{k}\ln(Ey^+)$ ……(6)

在穩流次層 $y^+>11.25 \Leftrightarrow \tau_w=\mu\frac{\partial U}{\partial n}=\mu\frac{\triangle U}{\triangle n}$ ……(7)

此處 $U^*=\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ 係摩擦速度（friction velocity），$y^+=\rho U^*\triangle n_p/\mu=\rho K_p^{1/2}C\mu^{1/4}\triangle n_p/\mu$ 係通用速度（universal velocity），k 係 Von Karman 常數（0.42），E 係經驗常數（9.81），Up 係流體於近壁 p 點處之速度，Kp 係流體於近壁網格點 p 處之紊流動能，$C\mu$ 係經驗常數（0.09），$\triangle n_p$ 係 p 點離壁之距離，μ 係流體黏度。

三、FLUENT 之拉格蘭散佈模式

當紊流場被以歐勒（Euler）參考標準解得後，FLUENT 之拉格蘭散佈模式被使用以模擬連續流中蒸發性霧粒之軌跡，其所需之假設如下：

1. 除了曳力（drag）與重力外，所有外力都被忽略。
2. 所有霧粒都是球形而且彼此間是分離的。
3. 霧粒相充分稀薄，亦即具相當低之體積百分率，通常低於10—12%，以致於霧粒與霧粒間相互作用與霧粒體積百分率對氣體連續相之影響可被忽略。根據 Rhee 氏等人[11]對噴霧體積百分率之估算研究，平扇形（flat fan）噴頭之體積百分率低於2%，因此，此處使用拉格蘭散佈模式以模擬霧粒移動相當可以接受。
4. 霧粒流被以定義良好之入口與出口狀況而注入連續流中。
5. 隨機行走（random walk）模式被使用以預測霧粒由於氣體連續相中紊流影響之散佈，瞬間紊流速度之變異對霧粒軌跡之影響則使用隨機方法（stochastic methods）加以涵括，然而，氣體連續相中霧粒對紊流之產生或消散並無直接影響。

FLUENT 之拉格蘭散佈模式係於拉格蘭參考標準下積分霧粒力量平衡而預測散佈霧粒之軌跡，根據牛頓第二定律（Newton's second law）霧粒之力量平衡可導得如下

$$m\frac{d\vec{V}_d}{dt}=\vec{F}_D+m\vec{g} \quad \cdots\cdots(8)$$

此處 m 係霧粒質量，$\vec{V}_d$ 係霧粒速度，$\vec{g}$ 係重力加速度，而曳力（drag force）$\vec{F}_D$ 可寫成

$$\vec{F}_D=-mk\ (\vec{V}_d-\vec{V}_w)\ =-\frac{1}{2}C_D\rho_a\frac{\pi d^2}{4}|\vec{V}_d-\vec{V}_w|\ (\vec{V}_d-\vec{V}_w) \quad \cdots\cdots(9)$$

此處 $\bar{V}_w$ 代表風速，而 k 可併入相對雷諾數(relative Reynolds number R_e)而寫成

$$k=\frac{18\mu_a}{\rho_d d^2}\frac{C_D R_e}{24} \quad \cdots\cdots(10)$$

$$\text{其中 } R_e=\frac{\rho_a d|\vec{V}_d-\vec{V}_w|}{\mu_a} \quad \cdots\cdots(11)$$

此處μ_a 係空氣之動黏度(dynamic viscosity)，ρ_d 係霧粒密度，d 係霧粒直徑，而曳力係數 C_D

之關係式 FLUENT 係使用 Morsi 與 Alexander 氏[8]所提供者如下所示

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{R_e} + \frac{a_3}{Re^2} \quad \cdots\cdots (12)$$

此處 a_1、a_2 與 a_3 係特定雷諾數範圍之常數。

K-ε紊流模式之紊流效果於本研究中係使用離散隨機行走（discrete random walk）模式加以處理，使用此種模式時速度之變動成份係時間之片段離散常數，其隨機値在渦流壽命特性決定之時間區段內保持固定，爲涵括紊流對霧粒散佈之影響，三維度空氣速度之瞬間値表示如下

$$u_a = \bar{u} + u', \ v_a = \bar{v} + v', \text{ and } w_a = \bar{w} + w' \quad \cdots\cdots (13)$$

此處 $\bar{u}$、$\bar{v}$、與 $\bar{w}$係平均空氣速度之三分量，而於紊渦流壽命時間內且正當霧粒通過時，數値佔優勢之 u'、v' 與 w' 係假設爲高斯機率分佈（Gaussian probability distribution）而如下加以決定

$$u' = \sqrt{\overline{u'^2}}, \ v' = \zeta\sqrt{\overline{v'^2}}, \text{ and } w' = \zeta\sqrt{\overline{w'^2}} \quad \cdots\cdots (14)$$

此處ζ係常態分佈之隨機數，而 $\sqrt{\overline{u'^2}}$、$\sqrt{\overline{w'^2}}$、與 $\sqrt{\overline{w'^2}}$ 係空氣速度變動之區域均方根値（local root mean square），對等向性 K-ε紊流模式而言，其可由紊流動能 K 而獲得如下

$$\sqrt{\overline{u'^2}} = \sqrt{\overline{v'^2}} = \sqrt{\overline{w'^2}} = \sqrt{\frac{2K}{3}} \quad \cdots\cdots (15)$$

假設霧粒與氣相渦流於渦流壽命內交互作用，當渦流壽命臨終時，瞬間速度之新値由引用另一常態分佈隨機數ζ而獲得，對與流體一起移動之小顆粒而言，渦流之特性壽命時間τ_e 係由流體之拉格蘭積分時間（Lagrangian integral time）T_{LI} 主宰，其可被定義成常數或對 T_{LI} 而隨機變動如下[4]

$$\tau_e = 2T_{LI} \quad \cdots\cdots (16)$$

$$\text{或 } \tau_e = -T_{LI}\log(r) \quad \cdots\cdots (17)$$

此處 r 係介於0與1之隨機數，而拉格蘭積分時間 T_{LI} 在 K-ε紊流模式中爲

$$T_{LI} \approx 0.15\frac{K}{\varepsilon} \quad \cdots\cdots (18)$$

四、FLUENT 之熱質傳計算

在 FLUENT 模擬中霧粒對連續流體相之影響，係以引進由於惰性加熱或冷卻（inert heating or cooling）以及蒸發（vaporization）而來之熱質傳而加以處理，惰性加熱或冷卻乃當霧粒溫度小於霧粒發溫度與霧粒揮發部份被耗盡後被使用，惰性加熱律被使用直至霧粒溫度達霧粒蒸發溫度，當霧粒揮發部份耗盡後熱傳計算回復採用惰性冷卻律，然而，當霧粒溫度達霧粒蒸發溫度後，霧粒蒸發之質傳必須被考慮直至霧粒達沸騰點或霧粒揮發部份完全耗盡。

對本研究進行之模擬而言，空氣流與霧粒被假設成同溫，且霧粒蒸發溫度設爲273K，因此只有霧粒蒸發之質傳被考慮，根據 FLUENT 使用者手册[4]其相關之公式如下

$$\text{For } T_d < T_{bp} \text{ or } m_d > (1 - f_{v0})\ m_{d0}$$

$$\frac{dm_d}{dt} = N_{i'}A_d\ M_{i'} = k_c(C_{i',s} - C_{i',\infty})A_d\ M_{i'}$$

$$= 2\pi d\frac{D_v\ M_{i'}}{\bar{R}}\ (1.0 + 0.3R_e^{1/2}\ Sc^{1/3})\left(\frac{P_{sat}}{T_d} - X_{i'}\frac{P_{op}}{T_\infty}\right) \quad \cdots\cdots (19)$$

此處 T_d 係霧粒溫度（K），T_{bp} 係沸騰溫度（K），m_d 係霧粒現時質量（kg），係 f_{v0} 係揮發比率，m_{d0}係霧粒初始質量（kg），$N_{i'}$ 係蒸汽莫耳通量（$\frac{mole}{m^2 \cdot s}$），A_d 係霧粒表面積（m^2），$M_{i'}$ 係品系 i′ 之莫耳重，k_c 係質傳係數（$\frac{m}{s}$），$C_{i',s}$ 與 $C_{i',\infty}$係在霧粒表面與連續相大氣中之蒸汽濃度（$\frac{mole}{m^3}$），d係霧粒直徑（m），D_v 係蒸汽在連續相大氣中之擴散係數（$\frac{m^2}{s}$），$\bar{R}$ 係理想氣體之通用氣體常數，R_e 與 S_c 係連續流之雷諾數與史密特數（Schmidt number），P_{sat} 係霧粒溫度下之飽和蒸汽壓（atm），$X_{i'}$ 係品系 i′ 之區域莫耳分數，P_{op} 係操作壓力（atm），T_∞係連續流之區域溫度（K）。方程式(19)中霧粒表面之蒸汽濃度乃假設在分界面之蒸汽偏壓等於霧粒溫度之飽和蒸汽壓而

評估（$C_{i',s}=\frac{P_{sat}}{\bar{R}T_d}$；而在連續相大氣中之蒸汽濃度係由求解品系 i′ 之傳播方程式而得（$C_{i',\infty}=X_{i'}\frac{P_{op}}{RT_\infty}$）。至於質傳係數 k_c 係由 Ranz 與 Marshall氏[10]有名之下述關係式而加以計算。

$$N_{um}=\frac{k_c d}{D_v}=2.0+0.6Re^{1/2}\ Sc^{1/3} \quad (20)$$

此處 N_{um} 係質量傳遞之那瑟數（Nusselt number）。在特定問題中，為了讓方程式(19)眞正可行，飽和蒸汽壓與二體擴散係數（binary diffusivity）必須於可能霧粒溫度之整體範圍中被準確地提供。

材料與方法

本研究使用模擬軟體 FLUENT 依「移動世界」策略[14]以模擬行進中噴霧屏蔽之效果，噴霧機被視為靜止之物件，而整個世界以固定之水平速度移動經過此噴霧機，因此，在此模擬中所有速度乃相對於位於噴霧機上之觀察者而言。假設噴霧機之水平速度為 U_s，為顧計「移動世界」之模擬，所有水平壁邊界（wall boundaries）之速度與進入模擬領域之水平空氣速度都必須被減去 U_s 以獲得眞正之相對速度。

圖 1 顯示雙弧形薄板屏蔽行進性能評估之二維度模擬領域，雙弧形薄板屏蔽位於模擬風下風處 1

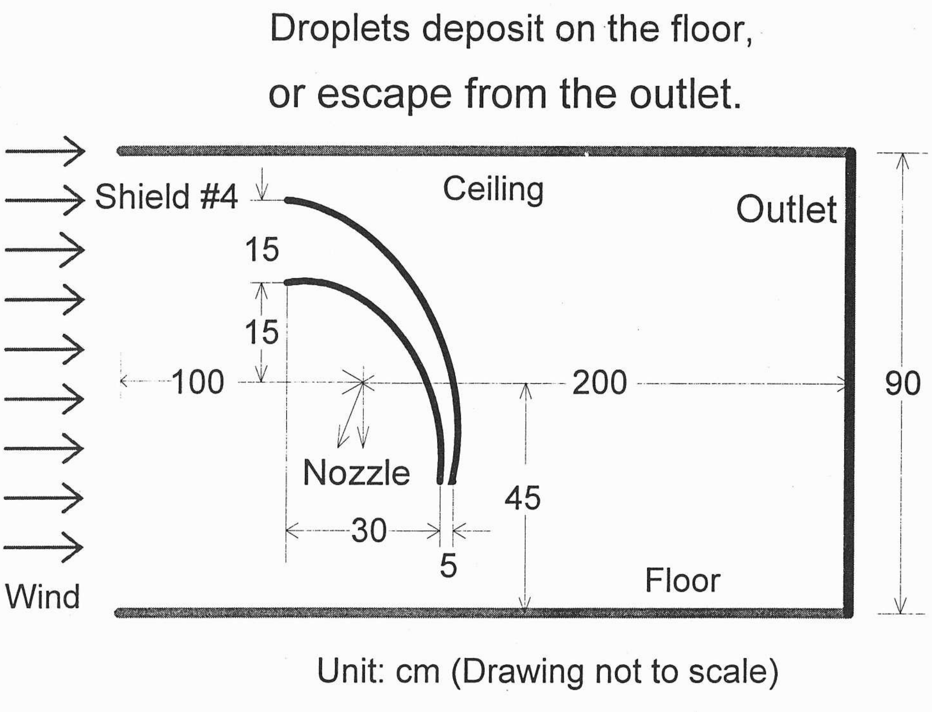

圖 1. 雙弧形薄板屏蔽行進性能評估之二維度模擬領域

Fig. 1. The simulation domain of moving double foil shields in two dimensional flow.

m處，詳細規格亦加註於此圖中，而模擬之噴頭則位於模擬風下風處1.15m 高度45cm 處，使用之模擬風速爲 6 m/s。至於三維度氣流中屏蔽比較之模擬，雙弧形薄板屏蔽與具氣流速度40 m/s、氣流流量1.7 $m^3/s/m$ 及氣流角度15度之氣流屏蔽被選擇以進行比較，其模擬領域長 3m、高 1m、寬 1m，噴霧屏蔽寬50cm，位於模擬領域之中心，且其中心在模擬風入口下風 1m 處。本部份之模擬亦採「移動世界」之模擬策略以模擬具1.34m/s 行進速度之屏蔽於逆風或順風情形下之作業，使用之模擬風速亦爲 6 m/s。

模擬所用之噴頭資料係以由 Malvern 雷射粒徑分析儀所獲得 Teejet XR 8002 噴頭之霧粒特性，按 Rosin-Rammler 粒徑與霧粒質量分佈[4]加以配湊而得下述之公式：

$$M_d = e^{-\left(\frac{d}{179.5}\right)^{1.64}} \quad \cdots\cdots (21)$$

此處 M_d 代表所有霧粒粒徑大於某特定粒徑 d 之質量比率（以小數表示），而 d 代表霧粒粒徑（以μm 表示）。所配湊 Rosin-Rammler 粒徑與霧粒質量分佈與原始之量測數據被比較並顯示於圖 2 中，顯然地，此一配湊之粒徑分佈在較大與較小霧粒範圍並非十分理想，但足以代表 TeeJet XR8002 噴頭而於本模擬研究中被使用以爲比較之標準。

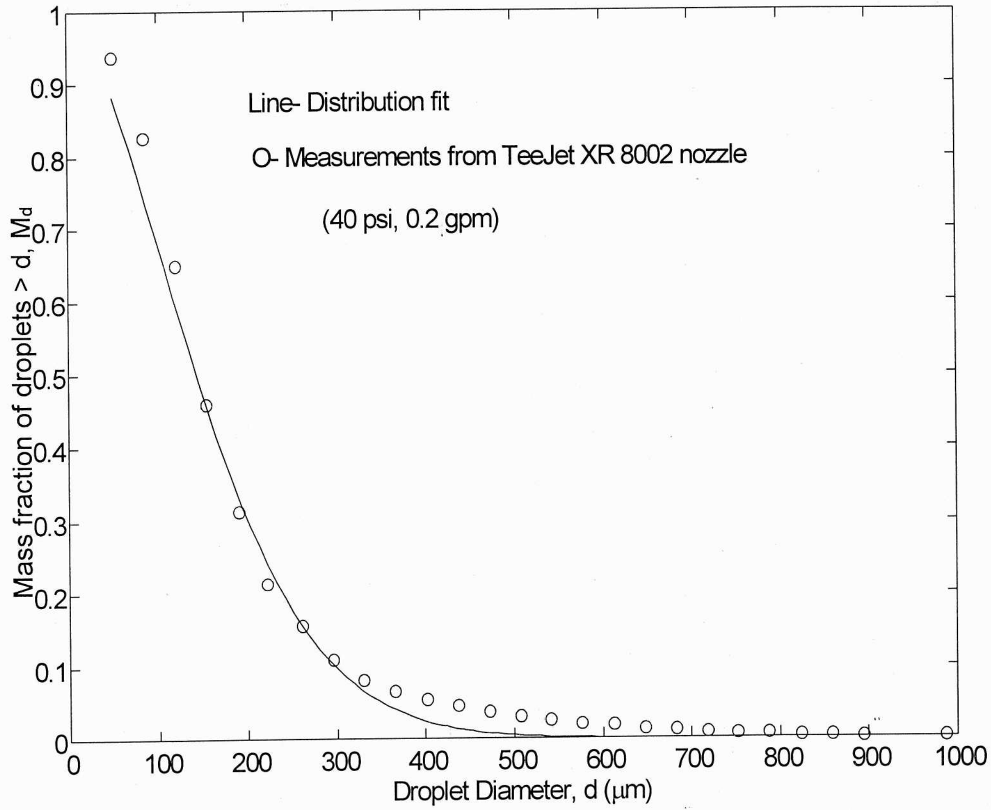

圖 2. TeeJet XR 8002 噴頭之 Rosin-Rammler 粒徑與霧粒質量分佈

Fig. 2. Rosin-Rammler size distribution fit for TeeJet XR 8002 nozzle.

爲著重於 TeeJet XR8002 噴頭所產生霧粒之主要粒徑範圍，本研究中所有模擬只考慮粒徑從50至600μm，而且爲模擬方便只有100個霧粒被釋放並加以分析，其粒徑分佈按下述之線性公式決定之。

$$d_I = d_{min} + \frac{d_{max} - d_{min}}{N-1}(I-1) \quad \cdots\cdots(22)$$

此處 d_I 代表第 I 個霧粒之粒徑（μm），d_{min} 乃最小之霧粒粒徑（50μm），d_{max} 乃最大之霧粒粒徑（600μm），N 代表模擬之總霧粒數（100），I 係表示每一霧粒用之指數，從1至 N。模擬所釋放之100個霧粒抑沉積附著於地上或從位於噴頭下風 2 m 處之出口而逃逸出模擬區域，本研究按 Young 氏[16]之定義稱此逃出模擬區域之部份霧粒爲飄移潛勢（drift potential）。

結果與討論

一、二維度氣流中噴霧屏蔽行進中之性能

行進中雙弧形薄板屏蔽於不同行進速度與行進方向下對降低飄移影響之模擬結果摘列於表 1 中，圖 3 顯示行進中雙弧形薄板屏蔽在行進速度1.34、1.79、2.24與2.68 m/s 時順、逆風作業之飄移潛勢與屏蔽上之霧粒附著，該圖中之圖例：「SH」代表雙弧形薄板屏蔽，「NoS」代表傳統之無屏蔽噴霧，「DN」代表噴霧機順風作業，「UP」代表噴霧機逆風作業，「20」代表霧粒釋放角20度，而「0」代表霧粒釋放角 0 度。

表 1. 行進中雙弧形薄板屏蔽之模擬結果

Table 1. Simulation results of the moving double foil shield.

	Travel Speed (m/s)			
	1.34	1.79	2.24	2.68
	Drift Potential (%)			
Sh[z]-Dn[y]-20[x]	47.692	45.403	42.841	42.419
Sh-Dn-0[w]	46.578	42.693	42.327	40.06
Sh-Up[v]-20	26.668	26.718	26.735	24.182
Sh-Up-0	24.116	24.164	24.178	24.217
NoS[u]-Dn-20	56.373	56.133	55.839	55.463
NoS-Dn-0	52.25	52.025	51.751	51.403
NoS-Up-20	57.205	59.299	59.378	59.446
NoS-Up-0	53.041	53.122	53.194	53.258
	Deposition On the Shield (%)			
DOS[t]-Dn-20	1.487	2.772	4.481	1.254
DOS-Dn-0	1.635	5.111	3.604	3.1

z Sh-Moving Double Foil Shield
y Dn-Traveling Downwing
x 20-Droplet Release Angle: 20 degrees
w 0-Droplet Release Angle: 0 degree
v Up-Traveling Upwind
u NoS-Conventional Spraying (No Shielding)
t DOS-Deposition On the Shield (%)

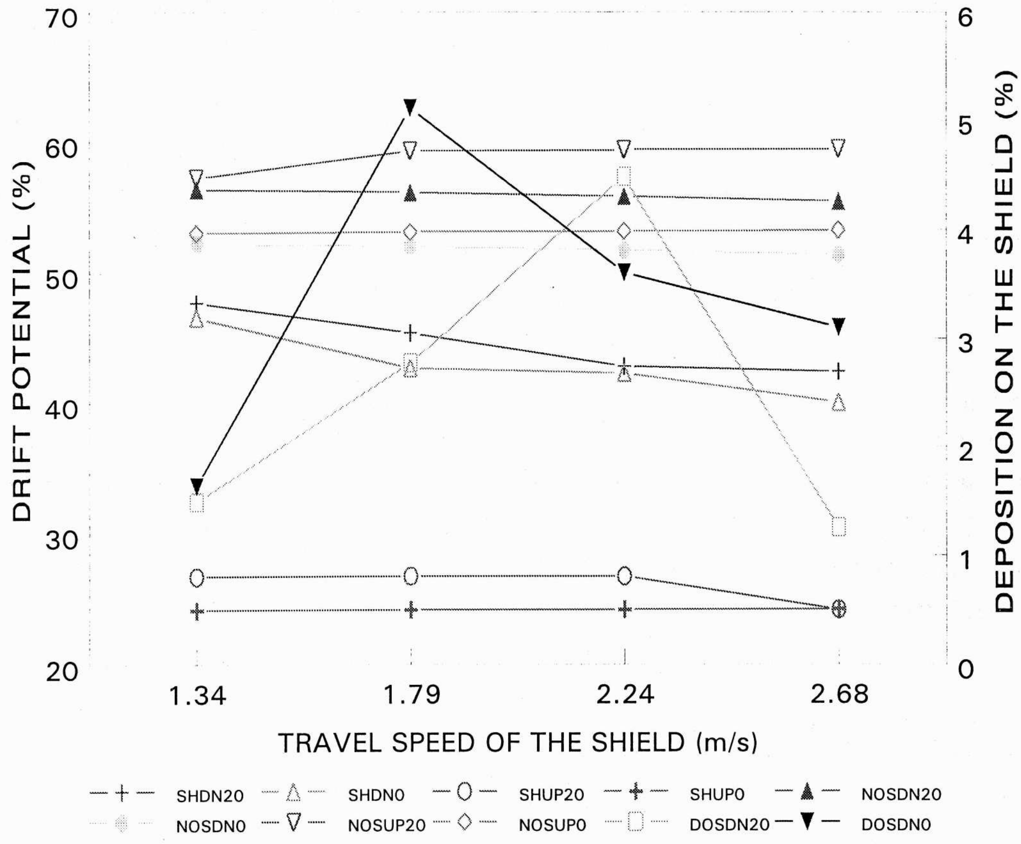

圖 3. 行進中雙弧形薄板屏蔽之飄移潛勢與屏蔽上之噴霧附著

Fig. 3. Drift potential and deposition on the shield of the moving double foil shield.

於討論行進中雙弧形薄板屏蔽之飄移潛勢前，吾人先探究相同狀況下傳統噴霧之飄移潛勢，圖 3 中上方之四條曲線顯示使用傳統噴霧之情形，當噴霧機逆風作業時飄移潛勢隨行進速度之增加而略微增加，但是當噴霧機順風作業時只要噴霧機行進速度小於風速，飄移潛勢係隨著行進速度之增加反而降低。儘管不同行進速度間飄移潛勢之差異相當微小，此一趨勢卻十分明顯，其理由實際上起因於區域性相對速度（係指風速相對於噴霧機行進速度而言）之影響，區域性相對速度愈大，飄移潛勢愈大。此外，霧粒釋放角20度之模擬情況比霧粒釋放角 0 度者具較大飄移潛勢，此乃可預期之現象，因爲當霧粒被以20度之釋放角釋放時係逆風而上。

相同趨勢之飄移潛勢變化也於行進中雙弧形薄板屏蔽之模擬中顯現，但有一例外情況。當雙弧形薄板屏蔽以2.68 m/s 之速度逆風行進時，具霧粒釋放角20度向前之飄移潛勢理應高過其他較低行進速度之飄移潛勢，然而，模擬之結果顯示此情形下雙弧形薄板屏蔽之飄移潛勢卻是所有模擬行進速度中最低者，此可能意味著在2.68 m/s 之行進速度下，雙弧形薄板屏蔽所誘引之氣流凌駕風速與移動屏蔽間區域相對速度之影響。

從模擬所得之結果明顯可知，雙弧形薄板屏蔽之表現不管是逆風或順風作業都比無屏蔽噴霧來得佳，就四行進速度與兩霧粒釋放角度平均而言，雙弧形薄板屏蔽相對於無屏蔽逆風噴霧分別對逆風與

順風作業提供55.1％與21.9％之減低飄移效果，而雙弧形薄板屏蔽逆風作業顯然比順風作業有較低之飄移潛勢，圖 4 解釋爲何雙弧形薄板屏蔽順風作業有較低減低飄移效果，圖中霧粒軌跡之不同顏色係代表不同之霧粒直徑，深藍色者代表霧粒直徑介於50至94.4μm間，藍色者代表霧粒直徑介於100至283μm間，而綠色、黃色與紅色者分別代表霧粒直徑從289遞增至600μm。基本上雙弧形薄板屏蔽不管逆風或順風作業之流場樣式（圖 5）都與靜止屏蔽之流場樣式（圖 6）相類似，唯具有不同之速度範圍，然而，當雙弧形薄板屏蔽順風作業時，霧粒釋放點變成位於屏蔽正後方之低速度區，很顯然地，此種情形下屏蔽誘引之氣流並不存在或未強大到足以壓制由小霧粒而來之飄移，因爲當噴霧機順風作業時，小霧粒受低速度區影響而被揚起，進而增加飄移潛勢，其中部份小霧粒通過雙弧形薄板屏蔽

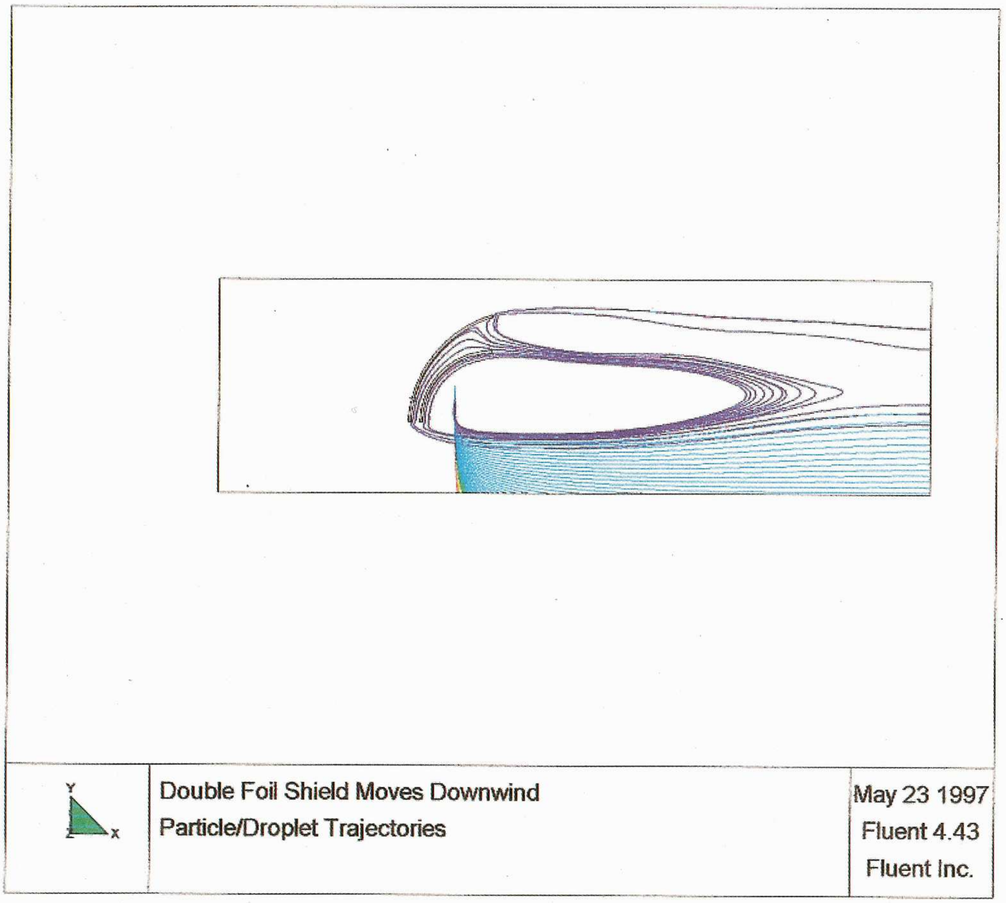

圖 4. 雙弧形薄板屏蔽順風作業於2.68 m/s 行進速度下之霧粒軌跡

Fig. 4. Droplet trajectories when the double foil shield moves downwind at a travel speed of 2.68 m/s.

間之開口，而隨屏蔽下方之高速氣流飛揚；另外部份小霧粒則穿越低速度區隨屏蔽上方之高速氣流飛揚；其餘之霧粒則沈積附著於屏蔽上。

圖 3 中亦顯示順風作業時不同行進速度下於屏蔽上霧粒之沈積附著，當前進速度在1.79與2.24 m/s 時，雙弧形薄板屏蔽似乎比於其他前進速度時有較多之霧粒附著，其意味著風速 6 m/s 與屏蔽行進速度在1.79或2.24 m/s 時之相對速度（大約 4 m/s）比於其他行進速度下之相對速度較容易使雙弧形薄板屏蔽因霧粒附著而變濕；至於逆風作業於雙弧形薄板屏蔽上並無霧粒附著之情形。

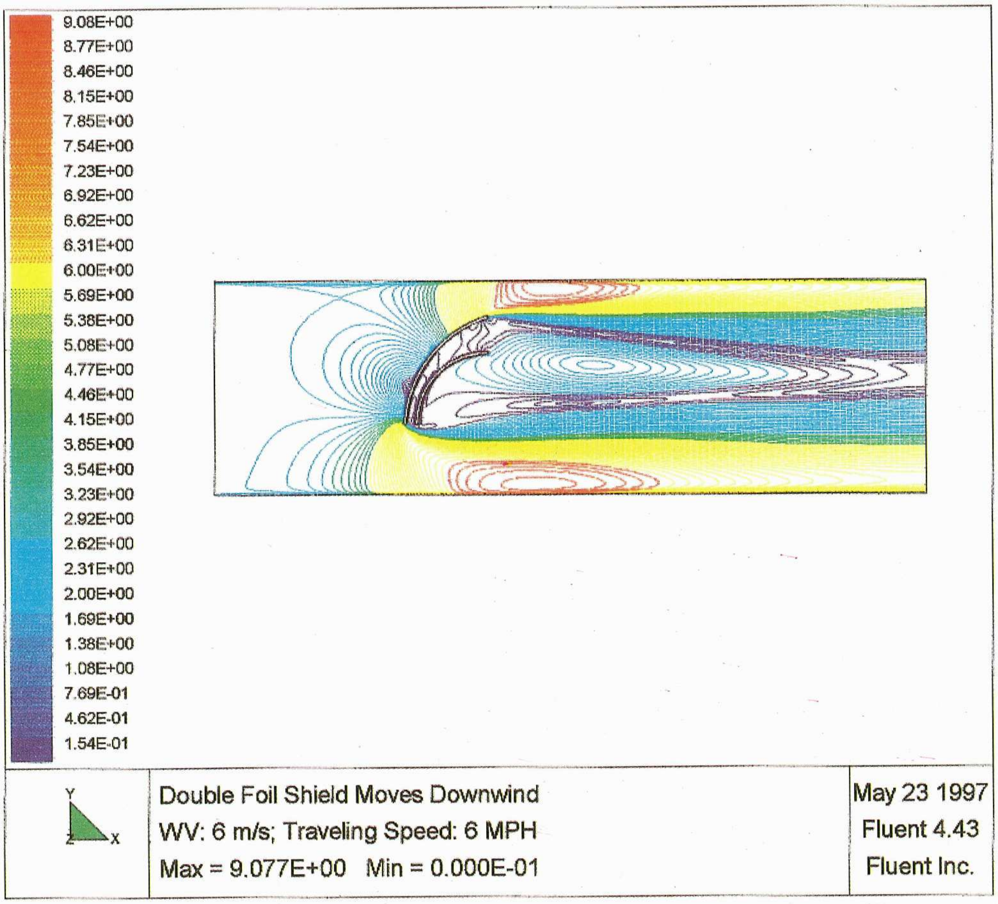

圖 5. 雙弧形薄板屏蔽順風作業於2.68 m/s 行進速度下之流場

Fig. 5. Flow field of the double foil shield moving downwind at a travel speed of 2.68 m/s.

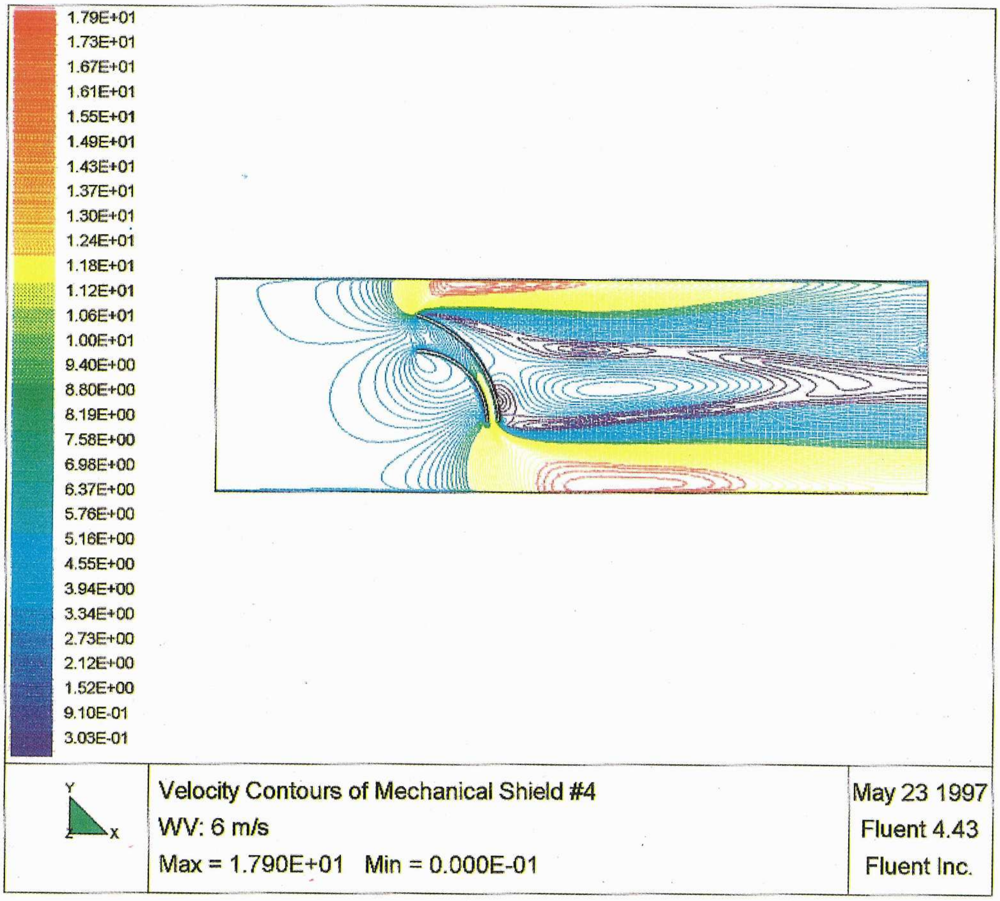

圖 6. 靜止雙弧形薄板屏蔽之流場

Fig. 6. Flow field of the stationary double foil shield.

二、機械式與氣流式噴霧屏蔽行進性能之比較

爲像二維度氣流中噴霧屏蔽行進性能之模擬般清楚顯現三維度氣流中噴霧屏蔽之流場，其流場係以於 X-Y 平面上之截面視圖加以顯示，圖 7 與圖 8 分別顯示雙弧形薄板屏蔽逆風與順風移動作業時對應流場之截面視圖，如圖所示兩流場形式相類似就像一般噴霧屏蔽之流場一樣，於屏蔽正後方產生一低速度區，然而兩者之低速度區卻有點不一樣，亦即逆風作業之低速度區往後下方延伸，而順風作業之低速度區往後上方延伸，此亦爲兩種作業方式下霧粒釋放時是否飛揚而成爲噴霧飄移之主要差異因素。圖 9 與圖10分別顯示雙弧形薄板屏蔽逆風與順風前進作業時之霧粒軌跡，類似前述二維度之模擬，小霧粒很明顯地於順風作業時比於逆風作業時被飛揚得較嚴重。至於氣流式屏蔽，其於逆風與順

風行進作業之流場與霧粒軌跡分別呈現於圖11至圖14中，從這些圖中可知，氣流式屏蔽在逆風與順風兩種作業情形下均顯現極佳控制噴霧飄移之性能。表 2 列示比較三維度氣流中屏蔽行進中性能之模擬結果，並以圖形呈現並說明於圖15中，從此圖可知，平均而言雙弧形薄板屏蔽分別於逆風與順風情形下以1.34 m/s 之行進速度作業時，可提供相較於傳統逆風向下噴霧達60.6%與29.3%之減低飄移效果，有趣的是具最佳操作設定（氣流速度40 m/s、氣流流量1.7m^3/s/m 與氣流角度15度）之氣流式屏蔽於1.34m/s 行進速度下，不管是逆風或順風作業都提供減低飄移之完全控制，另外，由於無實體結構位於由噴頭產生之噴霧附近，氣流式屏蔽並無霧粒附著於屏蔽上之問題。

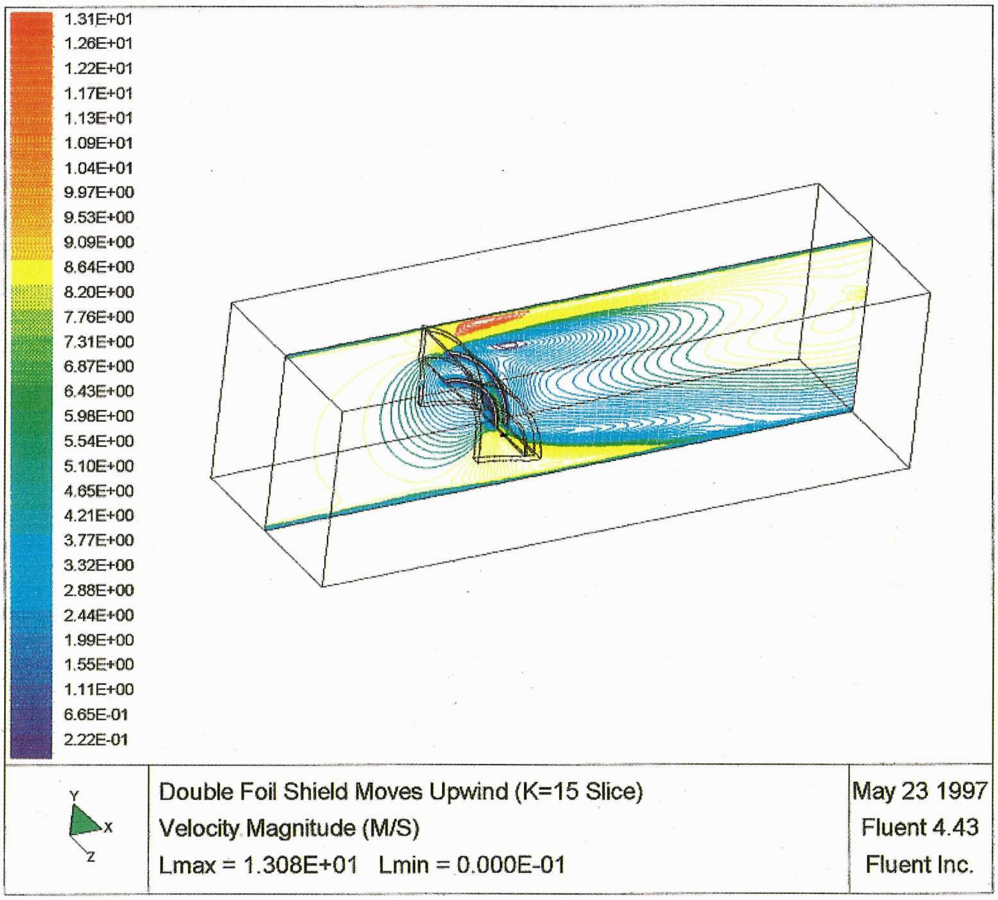

圖 7. 三維度氣流中雙弧形薄板屏蔽逆風作業之流場

Fig. 7. Flow field of the double foil shield moving upwind in three dimensional flow.

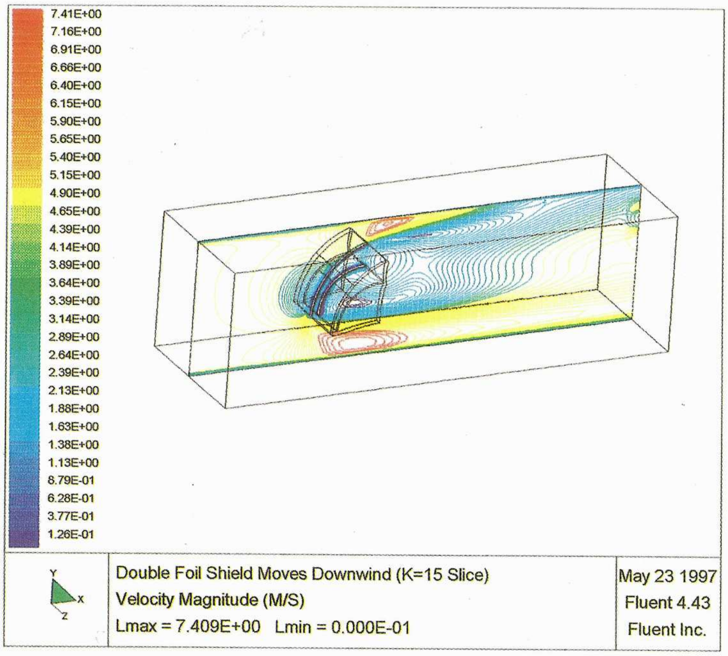

圖 8. 三維度氣流中雙弧形薄板屏蔽順風作業之流場

Fig. 8. Flow field of the double foil shield moving downwind in three dimensional flow.

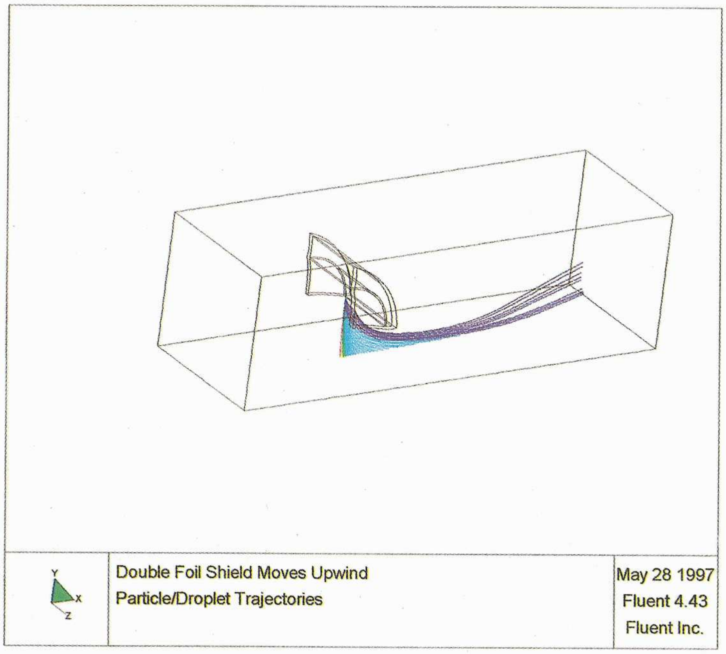

圖 9. 三維度氣流中雙弧形薄板屏蔽逆風作業之霧粒軌跡

Fig. 9. Droplet trajectories of the double foil shield moving upwind in three dimensional flow.

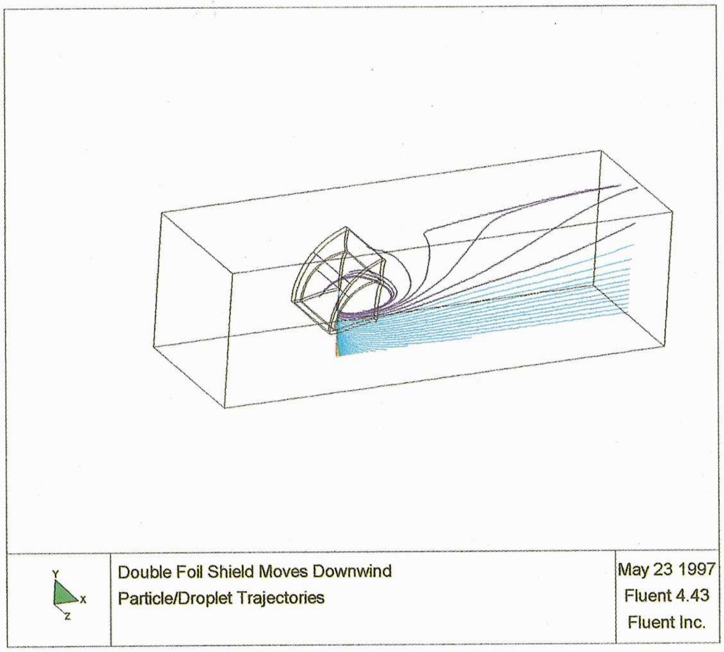

圖 10. 三維度氣流中雙弧形薄板屏蔽順風作業之霧粒軌跡

Fig. 10. Droplet trajectories of the double foil shield moving downwind in three dimensional flow.

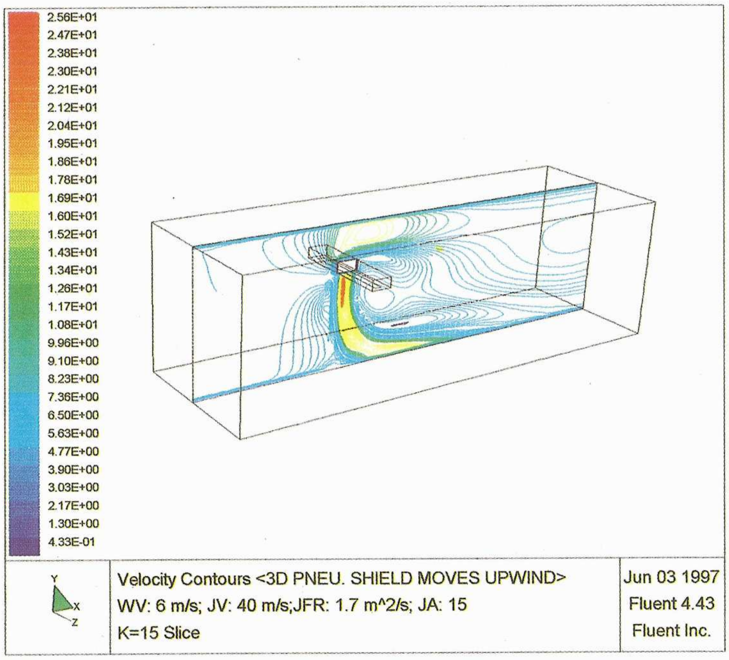

圖 11. 三維度氣流中氣流屏蔽逆風作業之流場

Fig. 11. Flow field of the pneumatic shield moving npwind in three dimensional flow.

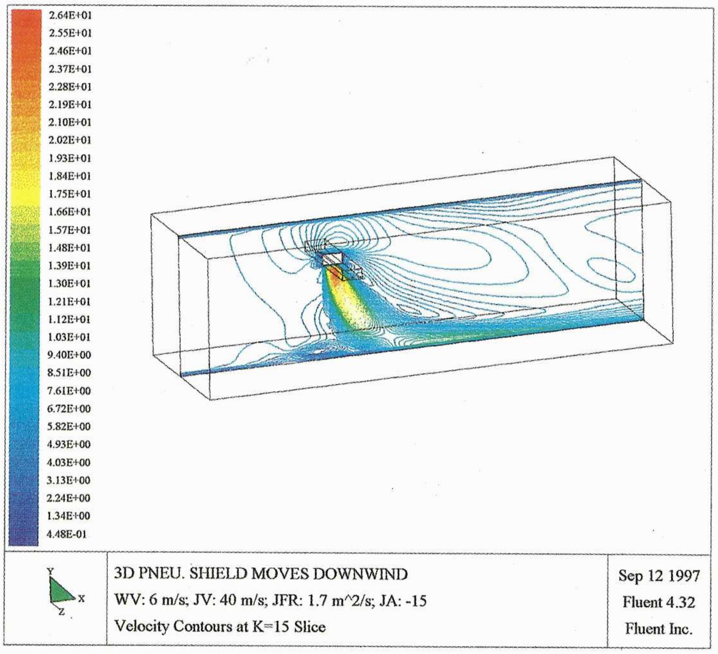

圖 12. 三維度氣流中氣流屏蔽順風作業之流場

Fig. 12. Flow field of the pneumatic shield moving downwind in three dimensional flow.

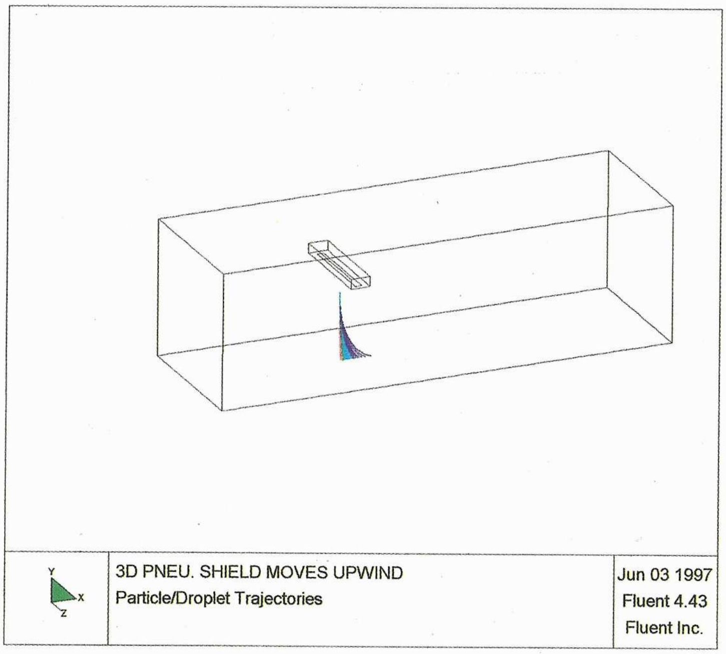

圖 13. 三維度氣流中氣流屏蔽逆風作業之霧粒軌跡

Fig. 13. Droplet trajectories of the pneumatic shield moving upwind in three dimensional flow.

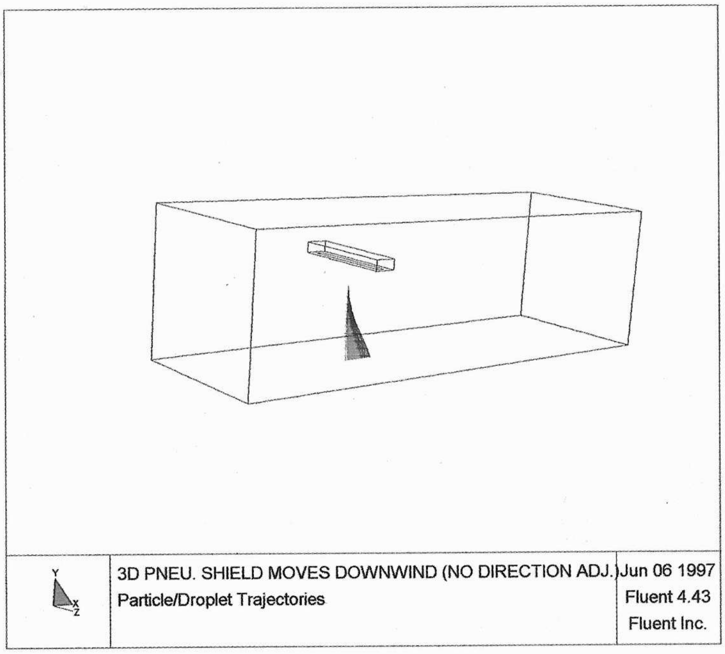

圖 14. 三維度氣流中氣流屏蔽順風作業之霧粒軌跡

Fig. 14. Droplet trajectories of the pneumatic shield moving downwind in three dimensional flow.

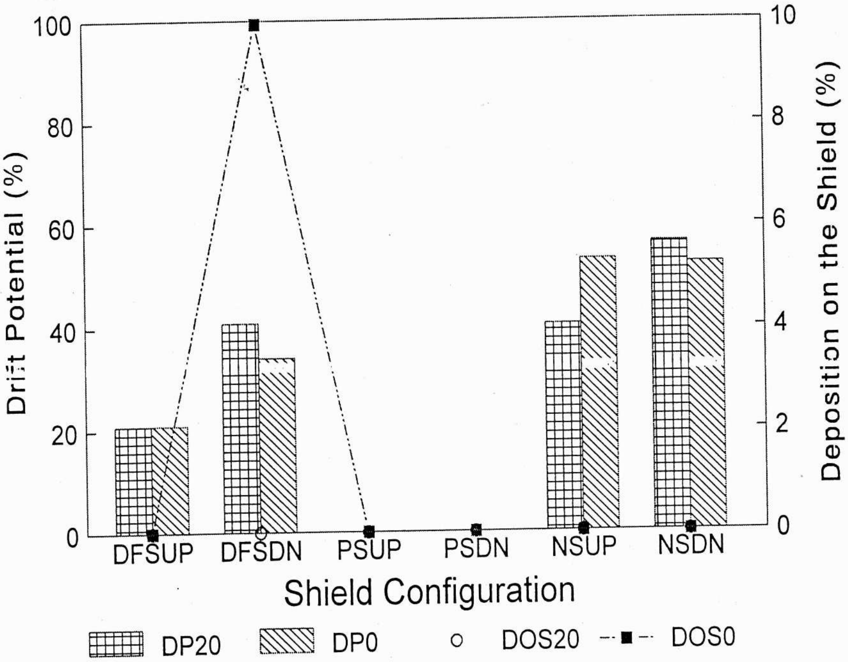

圖 15. 三維度氣流中行進屏蔽之性能比較

Fig. 15. Performance comparison of moving shields in three dimensional flow.

表 2. 比較三維度氣流中屏蔽逆風或順風行進作業之模擬結果

Table 2. Simulation results for comparing three dimensional shields moving upwind or downwind.

	DP[u]-20[r]	DP-0[q]	DOF[t]-20	DOF-0	DOS[s]-20	DOS-0
DFS[z]-UP[w]	20.854	20.892	76.881	77.001	0	0
DFS-DN[v]	40.902	34.099	53.083	51.302	0	9.941
PS[y]-UP	0	0	99.396	99.492	0	0
PS-DN	0	0	98.996	99.29	0	0
NS[x]-UP	40.484	53.043	57.208	44.766	0	0
NS-DN	56.389	52.264	40.503	44.774	0	0

[z] DFS-Double Foil Shield; [y]PS-Pneumatic Shield; [x]NS-No Shield
[w] UP-UPwind traveling; [v]DN-DowNwind travling
[u] DP-Drift Potential (%)
[t] DOF-Deposition On the Floor (%)
[s] DOS-Deposition On Shield (%)
[r] 20, [q]0-Droplet Release Angle (Degree)

結　論

一、風速與噴霧機行進速度間區域相對速度在控制行進中噴霧機之噴霧飄移上扮演重要角色，區域相對速度愈大，飄移潛勢愈大。傳統噴霧由於區域相對速度之影響，當噴霧機逆風作業時飄移潛勢隨行進速度之增加而略微增加，但當噴霧機順風作業時只要噴霧機行進速度小於風速，飄移潛勢係隨行進速度之增加反而降低；行進中雙弧形薄板屏蔽之模擬噴霧也顯現相同趨勢之飄移潛勢變化，唯有一例外情況。

二、違反共同趨勢之例外情況可能意味著，行進速度在2.68 m/s 之逆風作業下，雙弧形薄板屏蔽所誘引之氣流凌駕風速與移動屏蔽間區域相對速度之影響。

三、雙弧形薄板屏蔽對於降低飄移之表現，不管是逆風或順風作業都比無屏蔽噴霧來得佳，而逆風作業顯然比順風作業有較低之飄移潛勢，除了區域相對速度之影響外，順風作業時無屏蔽誘引氣流以資抑制小霧粒之飄移乃另一原因。

四、順風作業時，風速 6 m/s 與屏蔽行進速度在1,79或2,24m／s時之相對速度（約 4 m/s）比其他行進速度下之相對速度較容易使雙弧形薄板屏蔽因霧粒附著而變濕；而逆風作業時，於雙弧形薄板屏蔽上並無霧粒附著之情形。

五、比較三維度氣流中屏蔽性能之模擬結果顯示雙弧形薄板屏蔽分別於逆風與順風情形下以1.34 m/s 之行進速度作業時，可提供相較於傳統逆風向下噴霧達60.6%與29.3%之減低飄移效果；而具最佳操作設定之氣流屏蔽於1.34 m/s 行進速度下，不管是逆風或順風作業都提供減低飄移之完全控制。

誌　謝

本研究蒙美國俄亥俄州州立大學農業試驗與發展中心（OARDC/OSU）及美國農部農業研究服務農藥施用技術研究單位（USDA-ARS Application Technology Research Unit）提供模擬所需之軟硬體，始得以完成，特此誌謝。

引用文獻

1. 蔡致榮與 H. E. Ozkan。1998。氣流屏蔽式施藥系統之設計評估。 中華農業研究47(1)：印刷中。
2. Courshee, R. J. 1959. Investigation of Spray drift. part II: the occurrence of drift. Journal of Agricultural Engineering Research 4(3)：229—241.
3. Fehringer, R. J. and R. A. Cavaletto. 1990. Spray drift reduction with shrouded boom sprayers. ASAE Paper No. 90—1008, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
4. FLUENT Incorporated. 1995. FLUENT user's guide. Version 4.3 Fluent Incorporated, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766.
5. French, H., P. Alexander and B. Young. 1993. Adoption by farmers of shielded boom technology to reduce chemical drift from boom sprays. Department of Agriculture, Victoria, Food Research Institute, Sneydes Rd., Werribee VIC 3030, Australia.
6. Hinze, J. O. 1975. Turbulence. McGraw-Hill Book Company, New York.
7. Maybank, J., S. R. Shewchuk and K. Wallace. 1991. The use of shielded nozzles to reduce off-target herbicide spray drift. Canadian Agricultural Engineering 32：235—241.
8. Morsi, S. A. and A. J. Alexander. 1972. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. Journal of Fluid Mechanics 55(2)：193—208.
9. Ozkan, H. E., A. Miralles, H. Zhu, D. R. Reichard and R. D. Fox. 1996. Shields to reduce spray drift. ASAE Paper No. 96-1077, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
10. Ranz, W. E. and W. R. Jr. Marshall. 1952. Evaporation from drops. Part II Chemical Engineering Progress 48(4)：173—180.
11. Rhee, J., B. W. Young and L. E. Bode. 1990. Transport of spray droplets from flat-fan nozzles. ASAE Paper No. 90-1001, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
12. Smith, D. B., F. D. Harris and B. J. Butler. 1982. Shielded sprayer boom to reduce drift. Transactions of the ASAE 25(5)：1136—1140，1147.
13. Tsay, J. R. 1997. Effect of pneumatic and mechanical shields on spray deposition and drift. Ph. D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
14. Walklate, P. J., K. L. Weiner and C. S. Parkin. 1993. Computational fluid dynamics: a tool for evaluating air assistance sprayer design concepts. ANPP-BCPC-Second International Symposium on Pesticides Application Techniques pp 101—108.
15. Wolf, T. M., R. Grover, K. Wallace, S. R. Shewchuk and J. Maybank. 1993. Effect of protective shields on drift and deposition characteristics of field sprayers. Canadian Journal of Plant Science 73：1261—1273.
16. Young, B. W. 1990. Droplet dynamics in hydraulic nozzle spray clouds. Formulations and Application Systerns：10th Volune, ASTM STP1078, Edited by Bode, L. E., Hazen, J. L. and Chasin, D. G. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, US. pp 142—155.

Effect of Moving Shields by Simulation[1]

Jyh-Rong Tsay[2] and H. Erdal Ozkan[3]

Summary

Most wind tunnel experiments pertaining to shielded spraying were conducted under stationary conditions. As to field experiments, the interest was always focused on the investigation of drift amount. No information about the effect of a moving shield is available, not to mention the effect of travel speed and travel direction on the drift reduction. In this study, by using a computational fluid dynamics software, FLUENT, the double foil shield was used to investigate the effect of a moving shield on drift reduction under different travel speeds and travel directions (upwind and downwind). Related information of conventional spraying without shields was included. Also, the moving effect of mechanical and pneumatic shields in a three dimensional flow with only one droplet release nozzle was further compared. Main conclusions drawn from this study were as follows. Local relative velocity plays an important role on controlling drift potential of a moving sprayer. The higher the local relative velocity, the greater the drift potential. When the sprayer moves upwind, drift potential increases slightly with an increased travel speed. However, when the sprayer moves downwind, drift potential decreases inversely with an increased travel speed as long as travel speed is less than wind velocity. For the double foil shield, moving upwind produced less drift potential than moving downwind. Simulation results for comparing three dimensional shields showed that the double foil shield provided a drift reduction of 60.6% and 29.3% over the conventional spraying when traveling upwind and downwind, respectively, at a speed of 1.34 m/s. The moving pneumatic shield with the best operating setting provided an excellent control in drift reduction for both upwind and downwind traveling at a speed of 1.34 m/s.

Key words : Moving shield , CFD simulation, FLUENT.

---

1. Contribution No. 1922 from Taiwan Agricultural Research Institute.
2. Assistant Researcher, Department of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
3. Professor, Department of Food, Agricultural and Biological Engineering, Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA.